近红外窄带光照下不同水果背景中桔小实蝇的图像分割

娄定风[1,2]，刘新娇[1,2]，徐　浪[1,2]，赖天树[3]，余道坚[1,2]，
焦　懿[1,2]，陈志粦[1,2]，陈彦伦[4,*]

（1. 深圳市检验检疫科学研究院，广东深圳 518010；2. 深圳出入境检验检疫局动植物检验检疫技术中心，广东深圳 518045；3. 中山大学物理科学与工程技术学院，广州 510275；4. 中国科学院深圳先进技术研究院，广东深圳 518055）

摘要：【目的】为了增强水果背景中桔小实蝇 *Bactrocera dorsalis* Hendel（双翅目实蝇科）的识别效果，研究了该种昆虫与不同水果之间的反射光谱差异。【方法】采用紫外-可见光-近红外分光光度计测量了桔小实蝇与 16 种水果在 400 ~2 500 nm 波段的反射光谱。在中心波长为 565 nm 和 827 nm 的窄谱带光源及日光 3 种光源分别照射下，分别拍摄各种水果背景中的桔小实蝇照片，并用大津 Otsu 算法对照片进行二值化处理。【结果】发现桔小实蝇的反射率随波长增加而缓慢地增大，最大反射率小于 40%。而 16 种水果的最强反射峰全部或部分落在在 777 ~896 nm。不同水果平均最大反射率为 41.10% ~97.89%，与桔小实蝇在此波段的低反射率（约 30%）形成强烈的反差。在 827 nm 中心波长窄带光源照射下拍摄的照片中，发现桔小实蝇为黑色，而背景水果呈现大面积的白色，形成高反差，桔小实蝇很容易被辨识。相反，在日光和 565 nm 中心波长窄带光源照射的照片中，水果背景存在较多的黑色斑块，容易与桔小实蝇的黑区混淆；或者该虫形成白斑，从而无法识别。【结论】选用近红外波段的窄带光源照射能明显提高桔小实蝇与水果图像的对比度，增强桔小实蝇的分割效果。

关键词：桔小实蝇；水果；反射光谱；近红外光；图像识别

中图分类号：Q967　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**0454-6296(2014)08-0951-11

Segmentation of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Diptera, Tephritidae) on the background of fruits under the illumination of near-infrared narrow-band light

LOU Ding-Feng[1,2], LIU Xin-Jiao[1,2], XU Lang[1,2], LAI Tian-Shu[3], YU Dao-Jian[1,2], JIAO Yi[1,2], CHEN Zhi-Lin[1,2], CHEN Yan-Lun[4,*] (1. Shenzhen Academy of Inspection and Quarantine, Shenzhen, Guangdong 518010, China; 2. Shenzhen Exit and Entry Inspection and Quarantine Bureau, Shenzhen, Guangdong 518045, China; 3. School of Physics and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 4. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract:【Aim】To enhance the recognition effect of *Bactrocera dorsalis* Hendel (Diptera, Tephritidae) on the background of fruits, the difference in the reflectivity spectra of the insect and different fruits was studied.【Methods】The reflectivity spectra of *B. dorsalis* and 16 species of fruits were first measured in the wavelength range of 400 -2 500 nm using the UV-Vis-NIR spectrometer. Then images of the flies on the fruits were taken respectively under the illumination of narrow-band light with the central wavelengths of 565 and 827 nm as well as sunlight, and binarization of the images was made according to Otsu algorithm.【Results】We found that the reflectivity of *B. dorsalis* increased slowly with the wavelength, and approached to the maximum (<40%), while the strongest reflectivity peak of the sixteen species of fruits was located between 777 and 896 nm entirely or partially. The average maximum reflectivity of each species of fruit ranged from 41.10% to 97.89%, while that of *B. dorsalis* was approximately 30%, leading to a higher difference in this NIR (near-infrared light) range. It was found that *B. dorsalis* was

基金项目：深圳市基础研究计划项目(JC201105190976A)；国家质检总局科技项目(2008IK235)

作者简介：娄定风，男，1960 年生，江西南昌人，学士，高级农艺师，研究方向为昆虫物理检测，E-mail：lou_df@163.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yl.chen@siat.ac.cn

收稿日期 Received：2014-01-31；接受日期 Accepted：2014-04-14

dark on the large-area bright background of fruits in the images taken under the illustration of narrow-band light with a central wavelength of 827 nm, which can be recognized easily because of a high contrast between *B. dorsalis* and the fruits. Contrarily, under the illustration of sunlight and narrow-band light with a central wavelength of 565 nm, more black spots were found in the images of the fruits which were confused with the dark images of *B. dorsalis*, or the insect appeared as a white spot, causing recognition failure. 【Conclusion】 We confirmed that the image contrast between *B. dorsalis* and fruits, and the segmentation effect of *B. dorsalis* can be enhanced under the illumination of the NIR narrow-band light.
Key words: *Bactrocera dorsalis*; fruit; reflectance spectroscopy; near-infrared light (NIR); image identification

桔小实蝇 *Bactrocera dorsalis* Hendel，又名东方果实蝇(oriental fruit fly)，是重要的检疫性害虫，经常造成水果生产的巨大损失。成虫体色斑驳，形成保护色。停留在植物和水果上，与背景混杂在一起，有时较难发现。在进行昆虫图像识别时，与背景植物的某些斑点相混淆，不易识别。如何区分虫体与背景，成为肉眼辨识和图像识别的共同问题。

物体的色彩、形状和纹理所构成的图像是通过光照呈现出来的。根据 ISO 标准(ISO, 2007)定义，可见光的光谱波长范围在 400 ~ 780 nm，近红外线(NIR)在 780 ~ 3 000 nm。物体对不同波长的光有不同的反射率，在可见光范围如此，在红外波段也是如此。在植物及其果实的反射光谱方面有广泛的研究，杨可明等(2006)对植物反射光谱进行了详细的叙述：健康的绿色植物反射光谱曲线在可见光波段(400 ~ 760 nm)有一个小的反射峰，两侧有两个吸收带，即在 450 nm(蓝)和 670 nm(红)波段为低谷，这是因为叶绿素对蓝光和红光吸收作用强，而对绿光反射作用强。在近红外波段(700 ~ 800 nm)，反射率快速上升，至 1 100 nm 附近有一峰值。由于叶子内部的液态水分的强烈吸收作用，在 1 400, 1 900 和 2 700 nm 处有 3 个明显的低谷。此外在 1 600 和 2 200 nm 处也有两个反射峰。何东健等(1996)采用分光光度计测试了桃 *Amygdalus persica* L.、梨 *Pyrus* sp.、黄瓜 *Cucumis sativus* L. 和西瓜 *Citrullus lanatus* (Thunb.) 等果实的反射光谱；Peirs 等(2003)在苹果 *Malus domestica* Borkh. 果实上测试了反射光谱。这些果实的反射光谱均在近红外波段低端(800 ~ 1 100 nm)区域有一高峰，峰值区域的波长范围及反射率因果实种类、色彩、成熟度及损伤情况等不同而略有差异，总体上与典型的植物反射光谱相似。在昆虫光谱检测方面，Ridgway 和 Chambers (1996)对混有锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis* L. 的小麦采用近红外光谱进行害虫含量的检测，张田等(2010)应用光谱技术对森林病虫害进行监测等，主要是针对受害植物光谱或者植物混合昆虫的光谱与正常植物光谱的差异所做的研究。对昆虫本身光谱的研究则放在吸收光谱方面，如 Baker 等(1999)采用近红外光谱分析技术检测和识别被寄生的米象 *Sitophilus oryzae* (L.)，Perez-Mendoza 等(2002)采用近红外光谱分析技术推断家蝇 *Musca domestica* L. 的日龄。而对于昆虫本身的可见光-近红外波段的反射光谱未见报道，有关桔小实蝇的文献中也没有光谱研究的报道。在昆虫图像识别方面，主要是在可见光下拍摄昆虫图像进行识别，所用的可见光包含宽的光谱。目前采用的识别算法主要是基于昆虫图像的颜色、纹理、形状等特征来识别，其中昆虫的颜色与光谱是紧密相关的。竺乐庆等(2010)提取了鳞翅目昆虫翅面图像的色度、饱和度直方图作为识别特征。娄定风等(2012)发现某些昆虫图像识别率低与图像二值化后未能形成虫体的黑色区域有关，认为昆虫色彩与背景颜色的反差影响二值化效果，进而影响识别率。

昆虫保护色是指昆虫具有与背景色相似的颜色，以避免被天敌发现。从光谱的角度说就是在天敌可视波段，昆虫具有与背景相似的反射谱，便于伪装。本实验尝试通过测试桔小实蝇与水果在可见光-近红外波段的反射谱，寻找二者最大反射率差别的波段，通过采用该波段光照明拍摄昆虫图像，提高昆虫与背景物的反差，进而增强二值化图像分割效果，以便提高昆虫识别率。

1 材料和方法

1.1 昆虫与水果

实验用的桔小实蝇取自用番荔枝 *Annona squamosa* L. 饲养羽化后 10 日的成虫。16 种水果为市售的新鲜果实(表 1)。

表 1　测试水果种类

Table 1　Fruits for test

名称 Name	学名 Scientific name	分类地位 Taxonomy	颜色 Colour	产地 Origin
芒果 Mango	*Mangifera indica* L.	漆树科 Anacardiaceae	黄 Yellow	菲律宾 Philippines
番荔枝 Sweetsop	*Annona squamosa* L.	番荔枝科 Annonaceae	绿 Green	中国台湾 Taiwan, China
火龙果 Pitaya	*Hylocereus undulatus* Britt.	仙人掌科 Cactaceae	红 Red	越南 Vietnam
岭南山竹子 Mangosteen	*Garcinia oblongifolia* Champ. *ex* Benth.	藤黄科 Guttiferae	暗红 Dark red	泰国 Thailand
鳄梨 Avocado	*Persea americana* Mill.	樟科 Lauraceae	黑 Black	墨西哥 Mexico
龙贡 Langsat	*Lansium domesticum* Corr.	楝科 Meliaceae	黄 Yellow	泰国 Thailand
香蕉 Banana	*Musa nana* Lour.	芭蕉科 Musaceae	绿 Green	菲律宾 Philippines
樱桃 Cherry	*Cerasus fruticosa* (Pall.) G. Woron.	蔷薇科 Rosaceae	紫 Purple	智利 Chile
草莓 Strawberry	*Fragaria ananassa* Duch.	蔷薇科 Rosaceae	红 Red	中国大陆 Mainland, China
苹果 Apple	*Malus domestica* Borkh.	蔷薇科 Rosaceae	红 Red	美国 USA
李子 Plum	*Prunus salicina* Lindl.	蔷薇科 Rosaceae	红 Red	南非 South Africa
葡萄柚 Grapefruit	*Citrus paradise* Macf.	芸香科 Rutaceae	黄 Yellow	美国 USA
龙眼 Longan	*Dimocarpus longan* Lour.	无患子科 Sapindaceae	黄 Yellow	泰国 Thailand
荔枝 Litchi	*Litchi chinensis* Sonn.	无患子科 Sapindaceae	红 Red	中国大陆 China mainland
红毛丹 Rambutan	*Nephelium lappaceum* L.	无患子科 Sapindaceae	红 Red	泰国 Thailand
欧洲葡萄 Grape	*Vitis vinifera* L.	葡萄科 Vitaceae	暗红 Dark red	美国 USA

1.2　反射光谱测试和计算方法

采用 Cary5000 紫外-可见光-红外分光光度计测试桔小实蝇和水果的反射光谱。安装测试固体物质光谱的积分球,启动仪器配备的测试软件,设置为反射光谱测试模式。进行 baseline 校准后,将被测物体放置在积分球测试孔处固定。从 2 500 nm 波长开始,每隔 2 nm 测试一次反射率,测至 400 nm。在 800 nm 处有一次自动光源切换。将获取的测试结果数值导入反射光谱分析系统,使用插值计算出测试波段中每纳米波长下物体的反射率,每项完整光谱保存为一个数据组。

使用自行编写的“反射光谱分析系统(V1.0)”软件进行数据分析,计算各种水果最大反射率及其所在波长、峰值区域波长范围、桔小实蝇与各种水果反射率差异,计算及绘制反射率曲线、平均值曲线等。

最大反射率为一组反射光谱中的反射率最大值。最大反射率出现时的光波长为最大反射率波长。在反射光谱中,达到最大反射率的 90% 以上的反射率所覆盖的波长区间作为峰值波长区间。对昆虫及水果每一种类取 5 个或以上的个体,每个个体被分别测试反射谱。从每个个体反射谱中求取最大反射率、最大反射率波长及峰值波长区间。然后,针对同一种类的多个个体求取这些值的平均值。

由于水果较大,可以覆盖积分球的测试孔,所获得的反射率数据可以直接使用;而昆虫投影小于积分球测试孔,因此桔小实蝇的反射率使用下述方法获得:经过筛选,使用反射率较低而且反射曲线较为平直的黑鼠标垫作为背景材料,经过光谱测试获得鼠标垫反射率 R_1 的曲线图。将桔小实蝇固定在黑鼠标垫表面进行光谱测试,获得黑鼠标垫叠加桔小实蝇的反射率 R_2 的曲线图。设光线发射量为 L,鼠标垫反射量为 M,昆虫区域的反射量为 N,昆虫投影面积百分比为 a,叠加后鼠标垫剩余面积百分比为 b,则有:

鼠标垫反射率 $R_1 = M/L = (aM + bM)/L$;

叠加反射率 $R_2 = (aN + bM)/L$。

推算出桔小实蝇的反射率 R_3:

$$R_3 = N/L = (R_2 - R_1)/a + R_1 \quad (公式 1)$$

根据谢亮(2010)所述方法,拍摄圆形纸片上的桔小实蝇照片,圆形纸片直径为积分球的测试孔径 15 mm。在 Photoshop 中打开照片,选取该圆形纸片后,使用直方图功能读取圆形面积的像素数 P_1,再选取桔小实蝇的轮廓线,读取桔小实蝇面积的像素数 P_2,求得昆虫投影面积百分比:$a = P_2/P_1$。

将桔小实蝇投影面积百分比 a 代入公式 1 中,即可根据 R_1, R_2 和 a 推算出桔小实蝇反射率。R_1 和 R_2 在不同波长下不同,因此要计算每一波长 R_3 的值,形成一组数据。

各种水果与桔小实蝇在可见光-近红外波段反

射率差值 Rd,为各波长下水果的平均反射率 Rs 减去桔小实蝇的平均反射率 Rb:

$$Rd = Rs - Rb \quad \text{(公式 2)}$$

1.3 不同光谱光照下图像摄取

采用 3 种光谱光源照明,包括日光、中心波长 565 nm 和 827 nm 的窄带光源。其中 565 nm 光源光谱范围对应水果与桔小实蝇反射率差别较小的波长区间,而 827 nm 光源光谱范围对应反射率差别最大的波长区间。使用感光波长在可见光和近红外波段(至 1 100 nm)的 CMOS 摄像头拍摄。拍摄时将桔小实蝇成虫放置在水果表面上。在黑暗的室内环境下进行。日光照明采用晴天室内的散射光;窄带光照明采用经深圳市计量质量检测研究院测试的中心波长为 565 nm 和 827 nm 的发光二极管(LED),摄取的图像传递到计算机中进行储存和处理、分析。

1.4 图像二值化处理方法

对拍摄的照片采用最大类间差法(或称大津 Otsu 算法)(Otsu, 1979)进行二值化计算,该算法按图像的灰度特性,将图像分成背景和前景两部分。背景和前景之间的类间方差(variance between classes)越大,说明构成图像的两部分的差别越大,当部分前景被错分为背景或部分背景被错分为前景时,都会导致两部分的差别变小。因此,使类间方差最大的分割意味着错分概率最小。由于不受到图像亮度和对比度的影响,最大类间差法被认为是二值化阈值选取的最佳算法。

2 结果

2.1 水果反射光谱

水果反射光谱在可见光波段呈现光波长与反射率正相关的趋势,其中香蕉和芒果在 670 nm 处有明显的低谷,其他水果则不很明显。在红外波段,波长与反射率大致呈负相关的趋势,绝大多数水果在 1 450 nm和 1 920 nm 处有明显的低谷。欧洲葡萄反射谱较为平缓,没有明显的低谷(图 1)。不同种类的水果反射光谱不同,龙眼的最大反射率最高,樱桃和欧洲葡萄的最大反射率最低;芒果、草莓、荔枝、李子和葡萄柚等最大反射率波长较短,鳄梨的最大反射率波长最长(表 2)。

所测水果反射谱均呈现一个明显的主峰,最大反射率平均为 79.78%,最大反射率波长平均为 849 nm,峰值波长区间平均在 777 ~896 nm(表 2),可见水果的反射率峰值均在近红外波段低端的位置(图 1)。与文献中所述植物及果实的反射光谱基本吻合。

表 2 各种水果最大反射率及峰值范围

Table 2 Peaks of reflectivity in tested fruits

水果种类 Fruit species	最大反射率 (%) Maximal reflectivity	最大反射率波长 (nm) Wavelength at the maximal reflectivity	峰值波长区间 (nm) Wavelength range above 90% of the maximal reflectivity
龙眼 Longan	97.89 ± 2.81	867.2 ± 3.0	(802 ± 1) – (966 ± 2)
葡萄柚 Grapefruit	97.22 ± 0.97	797.4 ± 0.5	(688 ± 26) – (799 ± 1)
番荔枝 Sweetsop	96.78 ± 1.18	823.8 ± 38.1	(765 ± 32) – (902 ± 8)
苹果 Apple	90.60 ± 5.79	802.8 ± 7.1	(714 ± 11) – (857 ± 41)
岭南山竹子 Mangosteen	90.43 ± 5.07	898.4 ± 16.9	(821 ± 15) – (945 ± 13)
火龙果 Pitaya	88.17 ± 3.79	847.6 ± 28.7	(699 ± 54) – (880 ± 45)
香蕉 Banana	87.25 ± 1.03	808.0 ± 6.3	(749 ± 2) – (900 ± 6)
龙贡 Langsat	85.49 ± 4.64	951.2 ± 222.7	(894 ± 206) – (968 ± 238)
芒果 Mango	84.80 ± 13.33	794.4 ± 6.4	(737 ± 12) – (823 ± 51)
李子 Plum	78.52 ± 2.96	796.6 ± 1.5	(737 ± 3) – (847 ± 33)
荔枝 Litchi	75.30 ± 2.69	796.8 ± 1.1	(747 ± 12) – (799 ± 1)
红毛丹 Rambutan	73.08 ± 4.12	904.0 ± 3.5	(814 ± 12) – (933 ± 1)
鳄梨 Avocado	68.03 ± 11.73	1 028.8 ± 97.4	(1 002 ± 88) – (1 149 ± 60)
草莓 Strawberry	62.37 ± 3.15	797.0 ± 2.2	(719 ± 15) – (823 ± 53)
樱桃 Cherry	59.43 ± 8.37	857.6 ± 35.8	(806 ± 17) – (911 ± 17)
欧洲葡萄 Grape	41.10 ± 6.81	820.8 ± 35.0	(751 ± 47) – (839 ± 55)
平均 Average	79.78 ± 15.82	849.5 ± 67.2	(777 ± 80) – (896 ± 88)

表中数据为平均值 ± 标准差(*SD*)。Data in the table are means ± *SD*.

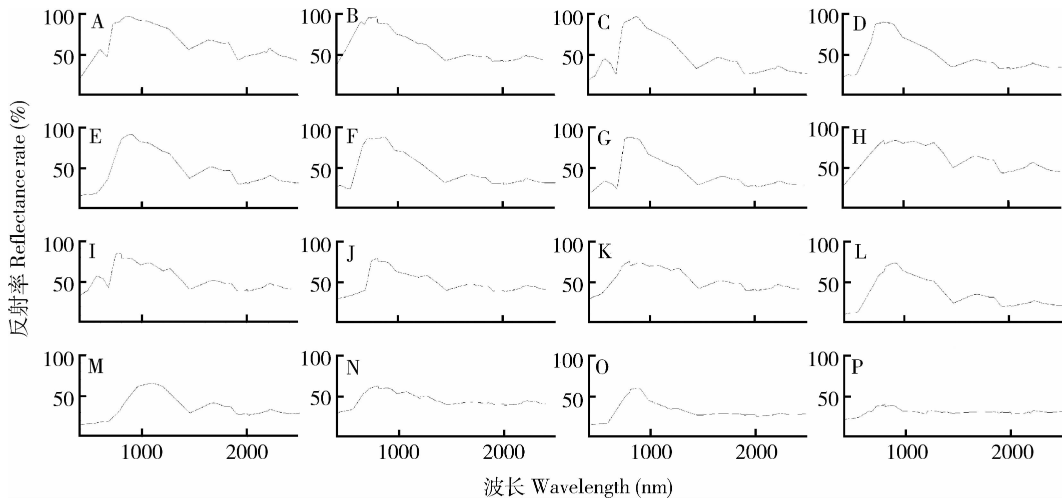


图 1　16 种水果可见光-近红外反射光谱

Fig. 1　Reflectance spectra of 16 fruits

A：龙眼 *Dimocarpus longan*；B：葡萄柚 *Citrus paradise*；C：番荔枝 *Annona squamosa*；D：苹果 *Malus domestica*；E：岭南山竹子 *Garcinia oblongifolia*；F：火龙果 *Hylocereus undulatus*；G：香蕉 *Musa nana*；H：龙贡 *Lansium domesticum*；I：芒果 *Mangifera indica*；J：李子 *Prunus salicina*；K：荔枝 *Litchi chinensis*；L：红毛丹 *Nephelium lappaceum*；M：鳄梨 *Persea americana*；N：草莓 *Fragaria ananassa*；O：樱桃 *Cerasus fruticosa*；P：欧洲葡萄 *Vitis vinifera*.

2.2　桔小实蝇反射光谱

测试了 7 头桔小实蝇，反射率最低 12%，最高 48%，计算获得平均反射光谱曲线（图 2）。在400 ~ 2 500 nm 的测试范围内，反射光谱曲线呈现平缓上升的走势，没有明显的峰和谷；在 400 nm 处最低，2 220 nm附近最高。

2.3　桔小实蝇与水果的反射光谱差异

根据 2.1 和 2.2 节的水果及桔小实蝇在不同波长下的反射率，依据公式 2 计算出各种水果与桔小实蝇在可见光-近红外波段反射率差谱，如图 3。由于在近红外波段低端区域（777 ~ 896 nm），水果反射率均有一高峰，而桔小实蝇反射率较低且平稳。因此，反射率差谱在此区间呈现的峰，反映桔小实蝇与水果反射率在此波段的显著差异。

在上述区间左侧和右侧，水果与桔小实蝇的反射率差值较小甚至为负值，随水果种类而不同。在可见光段，反差值主要受到水果颜色的影响，表皮颜色较深的欧洲葡萄、樱桃、鳄梨、红毛丹、岭南山竹子反射率小于桔小实蝇的反射率，颜色浅的龙眼、葡萄柚、芒果、龙贡反射率大于桔小实蝇的反射率，其他水果介于中间，与桔小实蝇反射率大小有交错。由于叶绿素吸收带的影响，含叶绿素较多的水果在 670 nm 附近反射率差值较小。在近红外高端（约 1 500 nm以上），各种水果与桔小实蝇反射率差值变化较小。

2.4　不同光谱光照下水果背景中桔小实蝇的观察效果

植物反射光谱中可见光段的两个叶绿素吸收带之间存在一个反射峰，在近红外波段低端有一个最

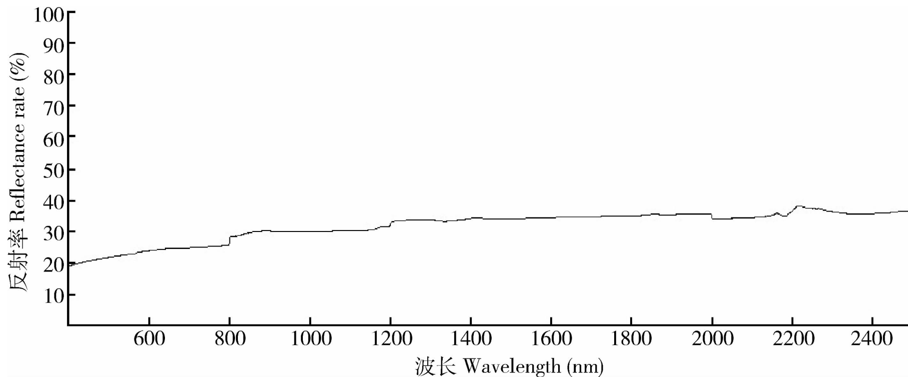


图 2　桔小实蝇可见光-近红外反射光谱

Fig. 2　Reflectance spectra of *Bactrocera dorsalis* in Vis-NIR spectrum

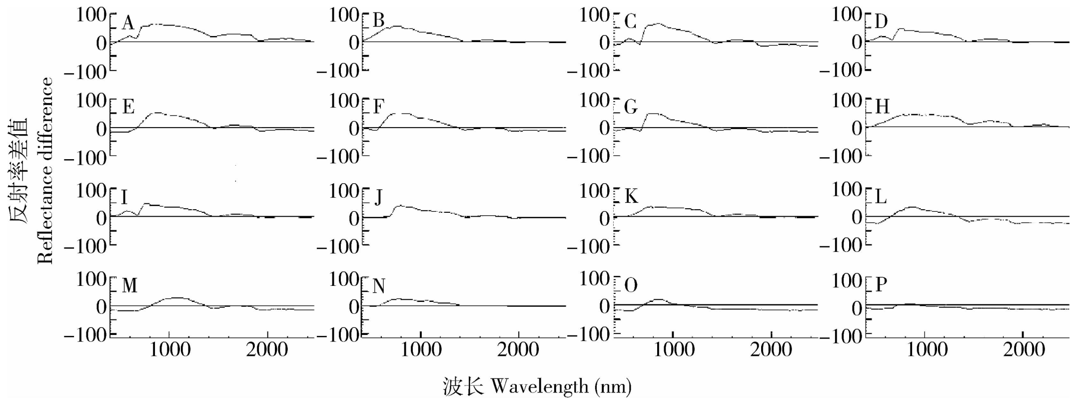


图 3 各种水果与桔小实蝇可见光-近红外反射率差谱

Fig. 3 Reflectance difference spectra between fruits and *Bactrocera dorsalis* in Vis-NIR spectrum

A：龙眼 *Dimocarpus longan*；B：葡萄柚 *Citrus paradise*；C：番荔枝 *Annona squamosa*；D：苹果 *Malus domestica*；E：岭南山竹子 *Garcinia oblongifolia*；F：火龙果 *Hylocereus undulatus*；G：香蕉 *Musa nana*；H：龙贡 *Lansium domesticum*；I：芒果 *Mangifera indica*；J：李子 *Prunus salicina*；K：荔枝 *Litchi chinensis*；L：红毛丹 *Nephelium lappaceum*；M：鳄梨 *Persea americana*；N：草莓 *Fragaria ananassa*；O：樱桃 *Cerasus fruticosa*；P：欧洲葡萄 *Vitis vinifera*.

高反射峰。在 2.1 节中可见部分水果有第 1 个反射峰，所有水果都有第2个反射峰。这两个高峰也是水果-桔小实蝇反射率差谱中的峰，见 2.3 节。使用这两个峰位置的波长光照进行拍照，检测是否能够获得高反差图像。

在两个峰区域，分别选用中心波长为 565 nm 和 827 nm 的 LED 窄带光源照明，拍摄照片，进行水果与桔小实蝇的图像反差比较。为了与普通日光下的图像反差相比较，将日光下拍摄的照片作为对照，如图 4 所示。同时测试用于拍照的水果与桔小实蝇反射谱，如图 5 所示。考虑到文章长度，仅给出 4 种代表性的水果-昆虫图像和反射谱对比。

在日光下，人眼辨识物体，一方面是通过色彩的差异，另一方面是依据明暗的对比。由于桔小实蝇身体混杂了黑色和黄色，在颜色较浅的龙眼、葡萄柚、番荔枝、苹果、火龙果、香蕉、龙贡、芒果（图 4：A）等水果上显出深色的虫体。而在深色的岭南山竹子、鳄梨（图 4：D）、樱桃、欧洲葡萄等水果上，虫体黄色部分与水果背景差异明显。因此，桔小实蝇摆放在颜色均匀且面积较大的多数水果表面时，一般清晰可辨。当水果表面色彩复杂不均匀时，例如果实过熟而形成斑点的番荔枝（图 4：G）上，以及果实颜色深且有浅色果蒂和枝条的欧洲葡萄（图 4：J）上，虫体黑黄相间的斑驳保护色使桔小实蝇不容易被辨识。

565 nm 波长窄谱带光照明时，物体的色彩的差异基本消失，虫-果明暗对比成为主要的反差来源。在比桔小实蝇反射率高的水果上，有两种反差类型：一类是日光下颜色较浅的龙眼、葡萄柚、番荔枝、香蕉、龙贡、芒果（图 5：A）等果实，在此波长下水果为浅色，虫体呈深色（图 4：B），反差较大；另一类是日光下颜色较深的苹果、火龙果等水果，在 565 nm 光照下颜色较深，但是比桔小实蝇颜色浅，反差较小。而在红毛丹、岭南山竹子、鳄梨（图 5：B）、樱桃、欧洲葡萄等反射率低于桔小实蝇反射率的水果上，水果为深色，桔小实蝇则呈浅色（图 4：E），反差较大。水果表面大且色彩均匀的，容易辨认果实上的桔小实蝇。水果表面在日光下色彩不均匀的，在此波长下仍然如此，番荔枝虽然反射率较高（图 5：C），但是果实上的斑点仍旧易与深色的桔小实蝇相混淆（图 4：H）；而在比桔小实蝇反射率低的欧洲葡萄（图 5：D）上，虫体为浅色，容易与果蒂、水果上的光斑等混淆（图 4：K）。

在 827 nm 波长的窄带红外光照下，物体间不存在色彩的差异，只有明暗的区别。该波长位于水果与桔小实蝇反射率差值的最高峰区域，所有水果的反射率均比桔小实蝇反射率的高（图 5），图像上水果均呈浅色，甚至番荔枝上过熟形成的斑点的颜色也变浅，而桔小实蝇为深色，反差很大，虫体清晰可反射率小于桔小实蝇的反射率，颜色浅的龙眼、葡萄柚、芒果、龙贡反射率大于桔小实蝇的反射率，其他水果介于中间，与桔小实蝇反射率大小有交错。由于叶绿素吸收带的影响，含叶绿素较多的水果在

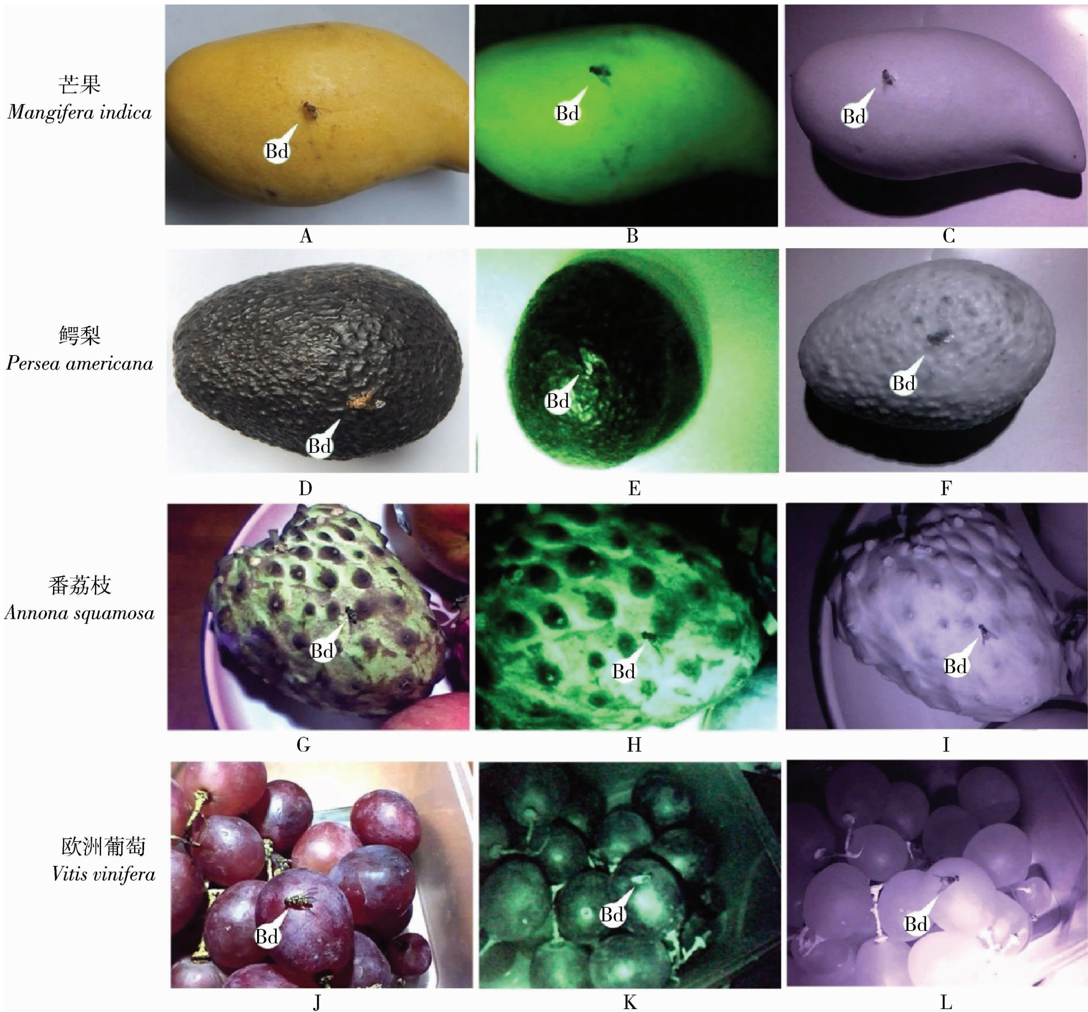


图 4　不同光照下不同水果背景上的桔小实蝇图像

Fig. 4　Images of *Bactrocera dorsalis* on different fruits under the illumination of various light

A, D, G, J：日光下 In the sunlight；B, E, H, K：565 nm 波长 Under 565 nm wavelength；C, F, I, L：827 nm 波长 Under 827 nm wavelength. Bd：桔小实蝇 *B. dorsalis*.

670 nm 附近反射率差值较小。在近红外高端(约 1 500 nm以上)，各种水果与桔小实蝇反射率差值变化较小。

2.5　不同光谱光照下不同水果背景的桔小实蝇图像二值化效果

基于形状和纹理的昆虫图像识别，利用背景与昆虫的明暗差异，将浅色区域和深色区域分开，形成黑白二值图，即所谓的图像二值化。二值化去除了色彩的差异，突出了明暗的区别，将背景处理为白色区域，将昆虫处理成独立的黑色区域。当图像中背景与昆虫的明暗反差足够大，就能成功地实现虫-果的区分。第 2.4 节中利用桔小实蝇与水果的高反射率差值区域的光照条件获得高反差图像，本节根据该节获得的日光、565 nm 及 827 nm 波长光照下桔小实蝇与水果背景的图像，进行二值化处理，比较处理的效果。

在日光下拍摄的照片二值化处理后，浅色水果如龙眼、葡萄柚、番荔枝、香蕉、龙贡、芒果等，形成大面积白色区域；桔小实蝇则形成清晰的黑色区域，昆虫区域容易分割(图 6：A)。深色水果包括苹果、火龙果、李子、红毛丹、岭南山竹子、鳄梨、樱桃、欧洲葡萄等，形成大面积的黑色区域，高光部分可形成少量白色区域；桔小实蝇黑色部分形成黑色区域，而虫体黄色部分可形成白色区域，由于该虫的轮廓为黑色部分构成，因而昆虫区域不容易区分(图 6：D, J)。二值化后的图像，水果黑色区域过大遮盖昆虫的区域，或者水果上的斑点或凹凹结构形成的黑色色斑与昆虫的黑色区域连接，都会导致无法区分昆虫。如：番荔枝虽然为浅色水果，但是果实上存放时间长了老熟时产生斑点，这些斑点会形成黑色斑块，与虫体黑色区域容易混淆(图 6：G)。

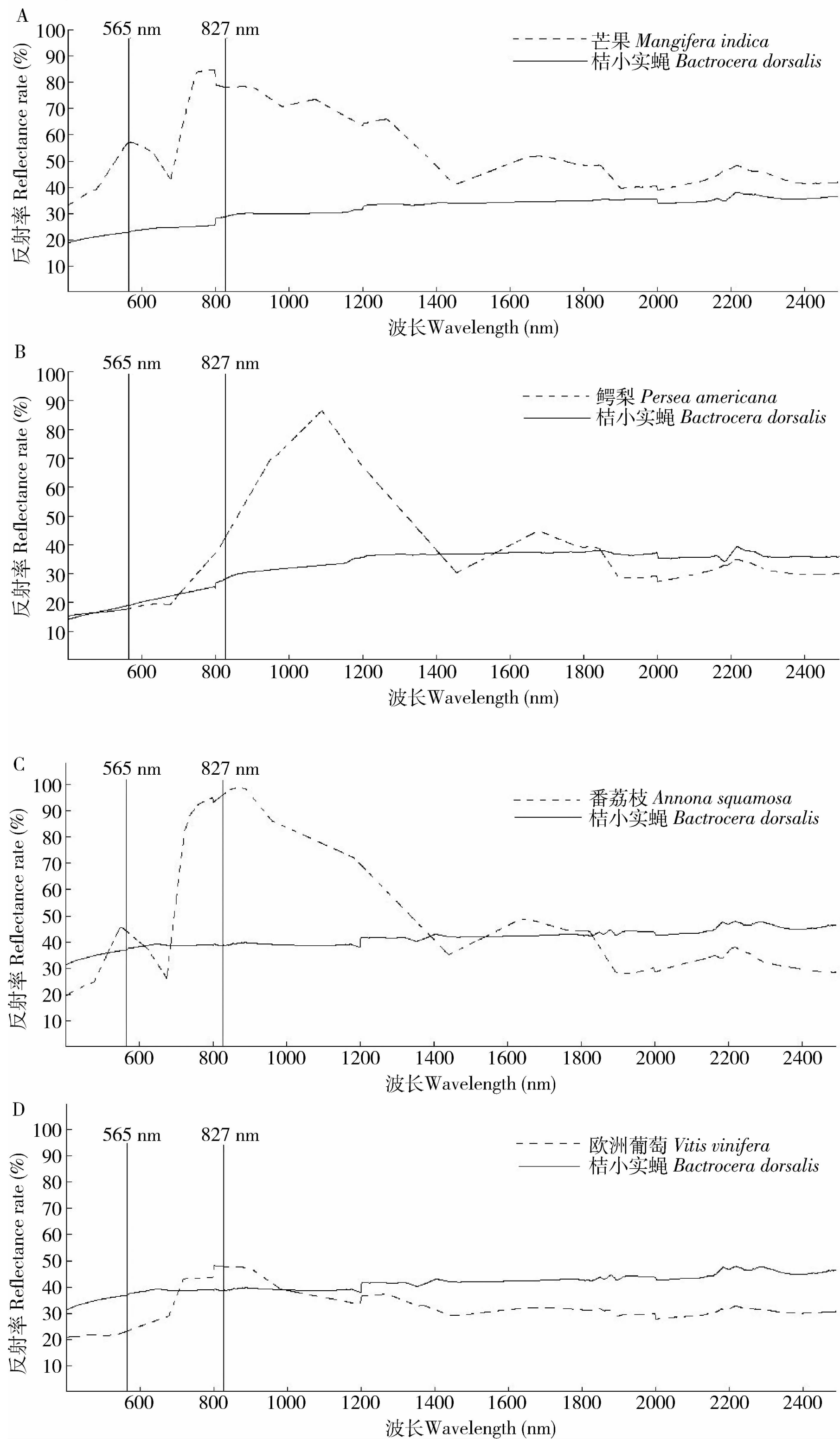


图 5 桔小实蝇与不同水果的反射谱比较

Fig. 5 Comparison of reflectance spectra between *Bactrocera dorsalis* and fruits

A：芒果 *Mangifera indica*；B：鳄梨 *Persea americana*；C：番荔枝 *Annona squamosa*；D：欧洲葡萄 *Vitis vinifera*.

用 565 nm 波长照明拍摄的照片，经过二值化处理，在比桔小实蝇反射率高的龙眼、葡萄柚、番荔枝、龙贡、芒果等果实上，表面形成大面积白色区域，虫体呈黑色区域，边界清晰(图 6：B)；番荔枝的斑点在该波长下依然为黑色斑块，与桔小实蝇形成的黑色区域容易混淆(图 6：H)；而在比桔小实蝇反射率

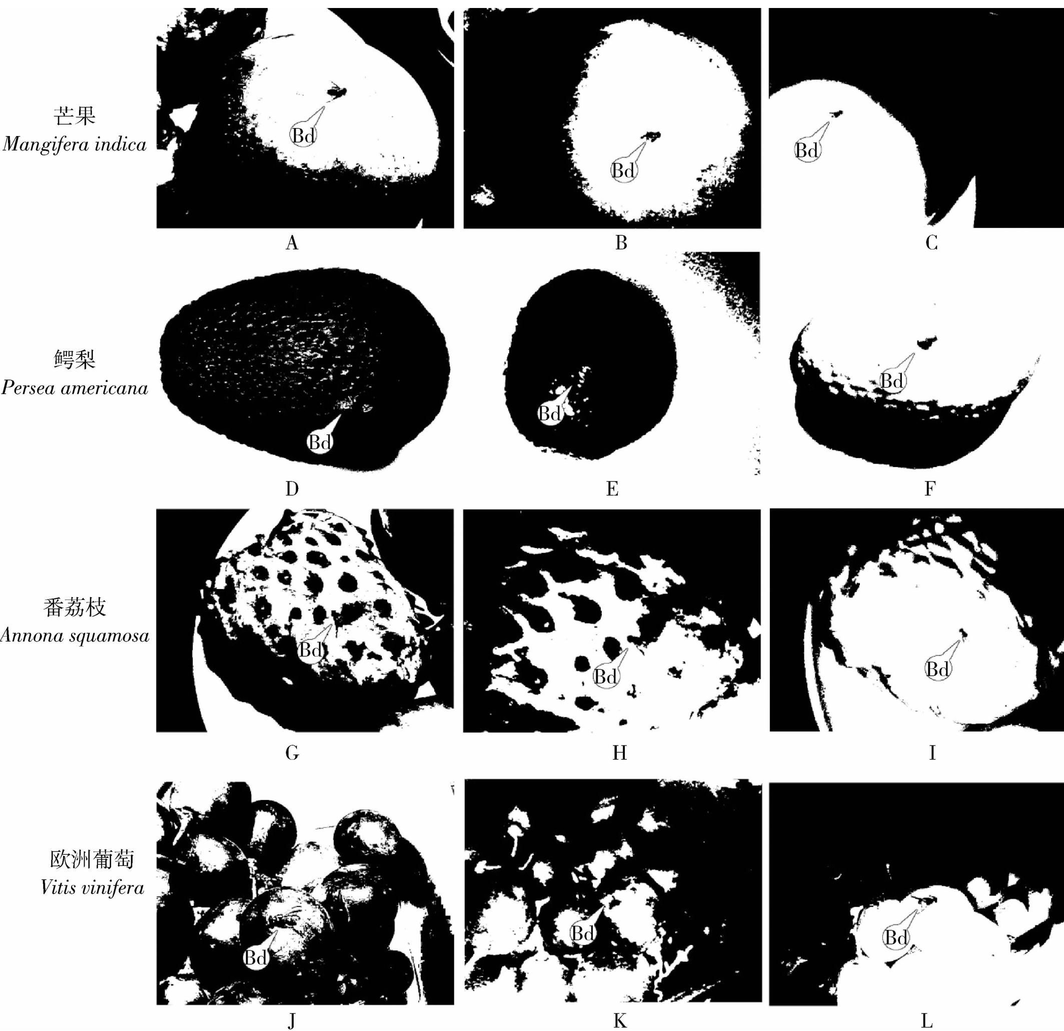


图 6　不同水果背景下桔小实蝇在不同光谱光照下成像的二值化图

Fig. 6　Binarized images of *Bactrocera dorsalis* on different fruit backgrounds under the illumination of various light

A，D，G，J：日光下 In the sunlight；B，E，H，K：565 nm 波长 Under 565 nm wavelength；C，F，I，L：827 nm 波长 Under 827 nm wavelength. Bd：桔小实蝇 *B. dorsalis*.

低的红毛丹、岭南山竹子、鳄梨、樱桃、欧洲葡萄等水果上，水果区域为黑色，虫体或其黄色部分形成白色区域（图 6：E），虽然与背景形成明显区别，但是与高光部分形成的白色区域，以及与欧洲葡萄的果蒂、枝条等白色部分容易混淆（图 6：K）。在一些反射率高于桔小实蝇而颜色较深的水果上，如苹果、火龙果等，由于虫、果均为较深的色彩，二值化时会将果实及虫体黑色部分均处理成黑色区域，只将桔小实蝇黄色部分处理成白色区域。

用 827 nm 波长照明获得的照片，由于各种水果的反射率高，原来深色水果也不再形成黑色区域，所有水果在二值化处理后均呈大面积的白色，水果上的高光、枝蒂等部分的白色区域与果实表面白色区域融合，甚至番荔枝的斑点也呈现白色；桔小实蝇反射率低，虫体图像区域均呈现黑色，不再与水果上的高光、枝蒂、斑点等部分混淆，明显区别于水果背景（图 6：C）。

3　讨论

本项研究尝试通过寻找桔小实蝇和水果之间反射光谱最大差别区间，采用该区间波长的光照进行拍摄，获取图像中桔小实蝇与水果的最大反差，从而提高桔小实蝇的识别效果。

作为背景物，不同水果的反射谱不完全相同，即使在同一个水果上，不同侧面成熟的程度不同，反射率曲线也有不同，在所测试的一个苹果的反射光谱曲线中，可以看到同一果实的绿侧在 676 nm 处有明显的低谷，而红侧则没有（图 7）。尽管如此，所有水果反射谱具有相似的共性，即在近红外波段低端具有最高反射峰，平均最大反射率为 41. 10% ～

97.89%，绝大多数水果的最强反射峰全部或部分落在 777～896 nm 近红外波段。在水果反射峰值的波长区间，桔小实蝇的反射率平均为 30% 左右，明显低于所有水果的反射率，因此该区域是桔小实蝇与所有水果反射率差异最大的区域。

在日光及 565 nm 波长的光照下，虽然在表面及颜色均匀的水果上能够辨认出桔小实蝇，但是当水果表面存在斑驳的颜色、附着物时，桔小实蝇的黑黄相间的色彩就为昆虫提供了保护色。然而，在桔小实蝇与所有水果反射率差异最大区域选取 827 nm 波长进行窄带光照，由于所有水果反射率高，呈现大面积的浅色，甚至可见光下不均匀的颜色及斑块也消失了，桔小实蝇反射率低而呈现为深色，能够很清晰地辨认出来。为了验证 827 nm 波长下桔小实蝇的辨识效果，对猕猴桃 *Actinidia chinensis* Planch、橙 *Citrus sinensis*（L.）、梨 *Pyrus* sp.、柿 *Diospyros kaki* Thunb.、菠萝 *Ananas comosus*（Linn.）Merr. 等水果进行了测试，结果表明在这些水果上也能获得桔小实蝇清晰的图像，尤其在菠萝上能显著地克服桔小实蝇在可见光下因保护色而难识别的问题（图 8：B）。

作为昆虫图像识别第一步的图像二值化处理，是根据图像中明暗区域的差异来分割出昆虫区域。在日光和 565 nm 波长照明下，在部分水果上不能获得良好的分割效果。而在 827 nm 波长照明下，所有水果与桔小实蝇形成高反差，并且水果背景最干净，均可获得最佳的虫-果二值化分割效果。对猕猴桃、橙、梨、柿、菠萝等水果的验证测试也证明了这一点（图 8：C）。

桔小实蝇呈现黄黑相间的颜色，表明其身体不同部位对不同波长的反射率不尽一致。但是在虫-果反射率最大差值区间拍摄图像及二值化分割的实验中，桔小实蝇体表颜色的差别对实验结果没有很大影响。当然，如果能够获得微细部位的光谱，则可以提供更加精确的数据。

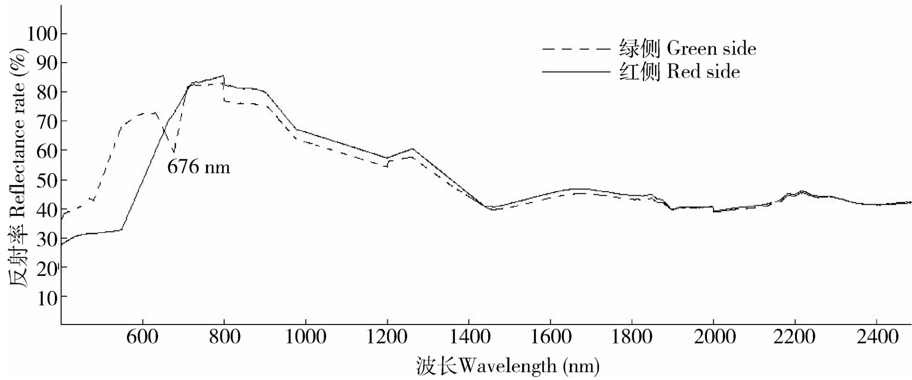


图 7 苹果不同部位的反射光谱

Fig. 7 Reflectance spectra of different sides of an apple

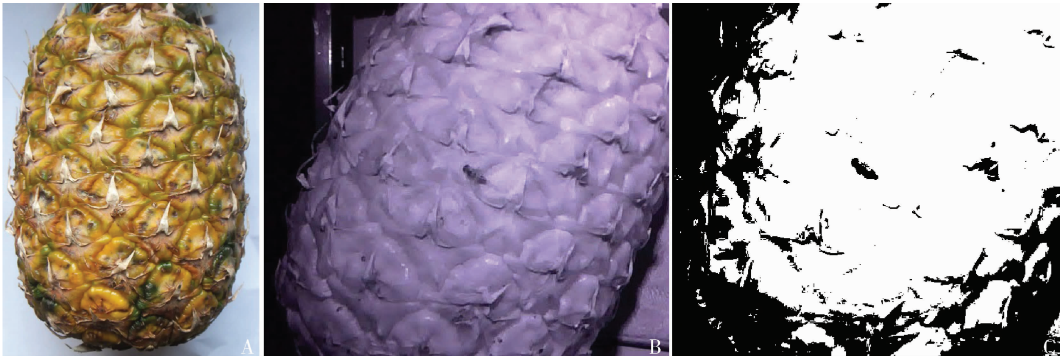


图 8 采用 827 nm 波长光照时桔小实蝇在菠萝背景下的辨识和二值化效果

Fig. 8 Effect of recognition and binarization of *Bactrocera dorsalis* with *Ananas comosus* as the background under the illumination of 827 nm narrow-band light

A：日光下图像 Image in the sunlight；B：827 nm 波长图像 Image under 827 nm wavelength；C：827 nm 波长图像二值化结果 Binarization of image under 827 nm wavelength.

在拍摄的图像中，光照强度对桔小实蝇与水果背景的反差有一定的影响。在光强过大的高光区域，水果表面发白，桔小实蝇仅有部分部位，如复眼及中胸背板等为深色，其余部位发白；光强适中时虫体整体与水果构成最大的反差；灯距较远处，光强降低，水果表面颜色渐深，与桔小实蝇的反差渐小；光照强度弱到一定的阈值以下，虫-果反差消失，二值化处理后二者均成为黑色区域而无法区分。

参考文献（References）

Baker JE, Dowell FE, Throne JE, 1999. Detection of parasitized rice weevils in wheat kernels with near-infrared spectroscopy. *Biological Control*, 16(1): 88 – 90.

He DJ, Yang Q, Xue SP, Xiong YZ, 1996. Spectral reflectance of fruits and near-infrared image processing in agricultural application. *Transactions of the CSAE*, 12(4): 80 – 84. [何东健，杨青，薛少平，熊运章，1996. 农产品分光反射特性及近红外图像处理在农业中的应用. 农业工程学报，12(4): 80 – 84]

ISO, 2007. ISO 20473: 2007. Optics and photonics-spectral bands. ISO, Switzerland.

Lou DF, Zhang GM, Jiao Y, Liu XJ, Chen ZL, Li QF, Deng L, Zhou L, Chen YL, 2012. Research on insect image recognition with a common algorithm based on shape and texture. *Plant Quarantine*, 26(4): 10 – 15. [娄定风，章桂明，焦懿，刘新娇，陈志粦，李秋枫，邓雷，周磊，陈彦伦，2012. 基于形状与纹理算法的通用昆虫图像模式识别研究. 植物检疫，26(4): 10 – 15]

Otsu N, 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1): 62 – 66.

Peirs A, Scheerlinck N, Nicolai BM, 2003. Temperature compensation for near infrared reflectance measurement of apple fruit soluble solids contents. *Postharvest Biology and Technology*, 30(3): 233 – 248.

Perez-Mendoza J, Dowell FE, Broce AB, Throne JE, Wirtz RA, Xie F, Fabrick JA, Baker JE, 2002. Chronological age-grading of house flies by using near-infrared spectroscopy. *Journal of Medical Entomology*, 39(3): 499 – 508.

Ridgway C, Chambers J, 1996. Detection of external and internal insect infestation in wheat by near-infrared reflectance spectroscopy. *J. Sci. Food Agric.*, 71(2): 251 – 264.

Xie L, 2010. Application of Photoshop pixel method to area calculation in a map. *Computer Knowledge and Technology*, 6(15): 4021 – 4022. [谢亮，2010. Photoshop 像素法在计算地图面积中的应用. 电脑知识与技术，6(15): 4021 – 4022]

Yang KM, Guo DZ, Chen YH, 2006. Analysis of vegetation spectral features based on hyperspectral imaging data. *Computer Engineering and Application*, 42(31): 213 – 216. [杨可明，郭达志，陈云浩，2006. 高光谱植被遥感数据光谱特征分析. 计算机工程与应用，42(31): 213 – 216]

Zhang T, Zhang XL, Liu HW, Pei XJ, 2010. Application of remote sensing technology in monitoring forest diseases and pests. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 38(21): 11604 – 11607. [张田，张晓丽，刘红伟，裴小节，2010. 遥感在森林病虫害监测中的应用研究. 安徽农业科学，38(21): 11604 – 11607]

Zhu LQ, Zhang Z, Zhang PY, 2010. Image identification of insects based on color histogram and dual tree complex wavelet transform (DTCWT). *Acta Entomologica Sinica*, 53(1): 91 – 97. [竺乐庆，张真，张培毅，2010. 基于颜色直方图及双树复小波变换(DTCWT)的昆虫图像识别. 昆虫学报，53(1): 91 – 97]

（责任编辑：袁德成）